

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iskra Ušćumlić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli, dipl. ing.

Student:

Iskra Ušćumlić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Posebno se zahvaljujem mentorici prof.dr.sc. Nastiji Degiuli na savjetima, pomoći i ukazanom povjerenju tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem asistentu dipl.ing. Ivanu Muniću za pomoć pri izradi 3D modela katamarana.

Hvala i mojim roditeljima na razumijevanju i podršci.

Iskra Ušćumlić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	9
2. OTPOR KATAMARANA	11
2.1. Općenito o otporu.....	11
2.2. Otpor katamarana	13
2.3. Faktori koji utječu na otpor katamarana	14
2.3.1. Utjecaj parametara forme na otpor katamarana	14
2.3.2. Utjecaj oblika trupa na otpor katamarana	16
2.3.3. Utjecaj oplakane površine na otpor katamarana	19
3. METODE ODREĐIVANJA OPLAKANE POVRŠINE	21
4. MOGUĆI IZVORI GREŠAKA PRI MODELSKIM ISPITIVANJIMA	25
4.1. Izvori grešaka	25
5. ANALIZA UTJECA GREŠKE OČITANJA OPLAKANE POVRŠINE NA VRIJEDNOST UKUPNOG OTPORA KATAMARANA	27
5.1. Određivanje vodne linije	28
5.2. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine modela broda	30
5.2.1. Sustavno variranje očitavanja cijele vodne linije	30
5.2.2. Sustavno variranje očitavanja pramčanog dijela vodne linije	33
5.3. Preračunavanje podataka sa modela na brod	36
5.4. Proračun snage broda u naravi za varirane vrijednosti sile ukupnog otpora broda ...	43
6. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA.....	48

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Amaryllis	9
Slika 2.2 Digitalan prikaz graničnog sloja	12
Slika 2.3 Modelsko ispitivanje katamarana	14
Slika 2.4. Slika valnog sustava	17
Slika 2.5 Digitalan prikaz valnog sustava broda.....	18
Slika 3.6 Fotografija modelskog ispitivanja.....	21
Slika 3.7 Podvodna fotografija vodne linije.....	24
Slika 5.8. Prikaz 3D modela katamarana.....	28
Slika 5.9. Nacrt rebara modela.....	28
Slika 5.10. Fotografija modelskog ispitivanja pri $v_M=6,001$ m/s.....	29
Slika 5.11 Očitana vodna linija na 3D modelu katamarana.....	30
Slika 5.12 Prikaz pomaknutih vodnih linija na oplati katamarana.....	30
Slika 5.13. Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine na izračun ukupnog koeficijenta otpora za $v_M=6,001$ m/s	32
Slika 5.14 Variranje vodne linije na pramcu	34
Slika 5.15 Grafički prikaz variranje pramčane vodne linije	35
Slika 5.16 Ovisnost promjene sile ukupnog otpora broda u odnosu na netočnost oplakane površine	39
Slika 5.17. Grafički prikaz utjecaja greške očitavanja oplakane površine na silu ukupnog otpora broda pri variranju samo pramčanog dijela vodne linije	42
Slika 5.18 Grafički prikaz potrebne snage u ovisnosti o sili ukupnog otpora broda	44
Slika 5.19. Grafički prikaz ovisnosti snage o sili ukupnog otpora dobivene variranjem samo pramčanog dijela vodne linije.....	45

POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine na izračun ukupnog koeficijenta otpora za $v_M=6,001$ m/s	32
Tablica 5.2 Utjecaj netočnosti očitavanja pramčane oplakane površine na izračun ukupnog koeficijenta otpora za $v_M=6,001$ m/s	35
Tablica 5.3 Proračun sile ukupnog otpora broda za variranje cijele vodne linije.....	40
Tablica 5.4 Proračun ukupnog otpora broda za variranje samo pramčanog dijela vodne linije	41
Tablica 5.5 Proračun potrebne snage za sile ukupnog otpora broda dobivene variranjem cijele vodne linije	43
Tablica 5.6. Proračun potrebne snage za sile ukupnog otpora dobivene variranjem samo pramčanog dijela vodne linije	45

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_T	N	sila ukupnog otpora
C_T		koeficijent ukupnog otpora
ρ	kg/m^3	gustoća tekućine
S	m^2	oplakana površina
v	m/s	brzina broda
B	m	širina broda
T	m	gaz broda
(M)		koeficijent vitkosti trupa
F_n		Froudeov broj
ϕ		koeficijent polja tlaka
k		faktor forme
σ		koeficijent povećanja ubrzanja strujanja
τ		koeficijent interferencije valova
C_F		koeficijent otpora trenja
C_w		koeficijent otpora valova
β		faktor viskoznog otpora interferencije
w		omjer dinamičke i statičke oplakane površine
∇	m^3	volumen istisnine
C_B		koeficijent punoće forme
p_a		apsolutna greška očitavanja
x_{mj}		mjerena vrijednost
x_p		referentna vrijednost
λ		mjerilo
P_E	W	efektivna snaga broda
C_{Fmon}		koeficijent otpora trenja jednog trupa
C_{Rmon}		koeficijent preostalog otpora jednog trupa

S	m	razmak trupova katamarana
R_S	N	otpor vodene prašine
R_{SP}	N	otpor tlaka vodene prašine
R_{SF}	N	otpor trenja vodene prašine
Wb		Weberov broj

SAŽETAK

Problem određivanja hidrodinamičkog sadržaja ukupnog otpora katamarana daleko je složeniji od istog problema prisutnog kod jednotrupnih brodova. Složenosti hidrodinamičkog sadržaja ukupnog otpora katamarana doprinosi i pojava interferencije trupova, koja može biti i viskozna i valna.

Kod brzih brodova, kao što su to katamarani stvarna, odnosno dinamička oplakana površina se vidljivo mijenja u odnosu na onu mjerenu pri mirovanju. Uzevši tu činjenicu u obzir, u ovome radu se usredotočilo na utjecaj promjene oplakane površine i njen učinak na proračun otpora broda, te potrebne snage. Dan je prikaz metoda pomoću kojih se može sa određenom točnošću odrediti dinamička oplakana površina. Detaljnije je opisana metoda određivanja dinamičke oplakane površine analizom fotografija modelskih ispitivanja, što je i metoda koja je korištena za određivanje oplakane površine u ovome radu.

Za proračun su se koristili podatci modelskih ispitivanja provedeni u Brodarskom Institutu u Zagrebu, na temelju kojih je izađen 3D model katamarana pomoću programa Rhinoceros 5.0. Analiziran je utjecaj netočnosti pri očitavanju dinamičke oplakane površine na vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora katamarana.

Dobiveni podatci su ekstrapolirani Froudeovom metodom na brod u naravi kako bi se odredio utjecaj greške određivanja dinamičke oplakane površine na silu ukupnog otpora broda

Ključne riječi: *katamaran, dinamička oplakana površin, viskozna interferencija, ukupni otpor, valna interferencija*

1. UVOD

Problematika otpora katamarana je vrlo zanimljivo pitanje, iako do sada vrlo slabo istraženo. Zbog rastuće potrebe za brzim brodovima za prijevoz putnika, veliko se zanimanje pokazalo za katamarane. Takav interes ne treba čuditi, jer katamarani posjeduju veliko palubno područje pogodno za prijevoz većeg broja putnika te dobru poprečnu stabilnost.

Katamarani su plovila koja nemaju jedan trup, već se sastoje od dva trupa međusobno povezana palubom, na koju se nadalje nastavlja nadgrađe. Ovakvi se brodovi najčešće koriste u putničkom prijevozu zbog velikih brzina koje postižu te se koriste kao plovila za jedriličarska natjecanja (kao npr. regata Princessa Sofia), a i sve više kao trup luksuznih megajahti (npr. Blue Coast 95 „Cartusche“).

Iako su katamarani relativno modernije forme, postoje dokumentacije da se ova forma koristila stoljećima u dijelovima Oceanije kao način putovanja na udaljene otoke. 1690-tih engleski pustolov i pirat William Dampier u Indiji, točnije u Tamil Nadu-u u Bengalskome zaljevu je prvi zabilježio, na engleskome jeziku, postojanje plovila nalik današnjem katamaranu. Pošto se to, tamilsko plovilo, sastojalo od trupaca međusobno povezanih špagom, naziv "katamaran" znači upravo to. Naime, na tamilskome je kattu- povezati, a maram- drvo. Današnje, modernije katamarane možemo zahvaliti amerikancu Nathanaelu Herreshoffu, koji je gotovo 200 godina kasnije, počeo raditi na katamaranskim formama te je 1875. godine izgradio svoj prvi katamaran Amaryllis.



Slika 1.1 Amaryllis [3]

Razvojem brodograđevne znanosti i industrije, idući za željom za što većom isplativosti uložene investicije u plovilo, iz katamaranske forme trupa razvile su se i druge više-trupne forme, od kojih neke imaju čak pet međusobno povezanih trupova.

Pri projektiranju plovila otpor broda je vrlo značajan podatak koji nam je potreban kako bismo mogli procijeniti potrebu za snagom, vrstom propulzora i sl. Najveća komponenta otpora je otpor trenja za čije određivanje je najvažniji parametar oplakana površina broda. Za brodove koji plove pri većim brzinama važno je znati stvarnu, odnosno dinamičku oplakanu površinu. Naime, kod deplasmanskih formi jednotrupnih formi oplakana površina se malo razlikuje s porastom brzine te je zato pogodno koristiti statičku (mjerenu na mirnoj vodi) oplakanu površinu. Kod brzih brodova, poludeplasmanske i gliserske forme i katamarana porastom brzine, oplakana površina se značajno mijenja u odnosu na onu mjerenu na mirnoj vodi. Ta promjena se očituje i u ukupnom otporu, a samim time i potrebnoj snazi broda.

2. OTPOR KATAMARANA

2.1. Općenito o otporu

Općenito govoreći, otpor broda je sila kojom okolna tekućina djeluje na brod suprotno od smjera kojim se taj brod kreće.

Naime, ako sagledamo plovilo u prostoru sile koje na njega djeluju su:

1. Sila gravitacije, odnosno težina broda, koja je jednaka umnošku mase broda i ubrzanja sile teže.
2. Sila hidrostatičkog uzgona
3. Ukupna hidrodinamička sila kojom okolna tekućina djeluje na brod
4. Sila poriva, koju generira propulzor.

Ukupnu hidrodinamičku silu možemo rastaviti na dvije komponente; na silu otpora, koja je paralelna s brzinom plovila, ali suprotnoga smjera i silu hidrodinamičkog uzgona, koji je okomita na brzinu broda.

Također, sila otpora je funkcija geometrije tijela, brzine, svojstva tekućine (kao što su gustoća i viskoznost) te gravitacije. Često se sila ukupnoga otpora zapisuje izražava preko koeficijenta ukupnog otpora C_T :

$$R_T = 0,5C_T\rho Sv^2 \quad (1)$$

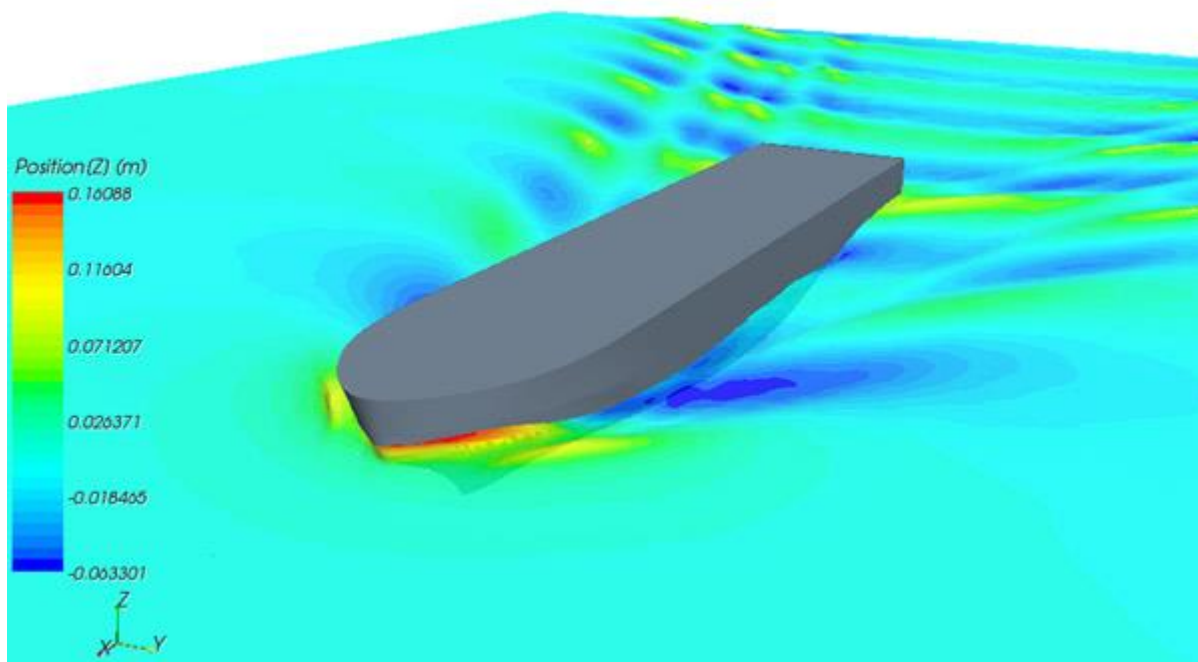
gdje su:

ρ – gustoća tekućine, kg/m^3 ,

v – brzina broda, m/s ,

S – oplakana površina, m^2 ,

C_T – koeficijent ukupnog otpora.



Slika 2.2. Digitalan prikaz graničnog sloja broda [2]

Otpor broda je vrlo složena pojava koju je potrebno, kako bi ju bilo moguće riješiti, podijeliti na komponente. Imajući to na umu, ukupni otpor možemo podijeliti na otpor trenja i preostali otpor. Preostali otpor se sastoji od otpora valova, viskoznog otpora tlaka i otpora uslijed zakrivljenosti oplata. Također u preostali otpor možemo ubrojiti i dodatne komponente otpora uslijed hrapavosti oplata, utjecaja zraka i vjetra i sl. Otpor trenja čini najveći udio u ukupnom otporu, te je direktna posljedica postojanja graničnog sloja i gibanja kroz viskozni fluid.

Otpor trenja je u uskoj vezi s tangencijalnim naprezanjima između okolne tekućine i oplata broda, što je izravna posljedica postojanja strujanja oko brodske forme, tj. graničnoga sloja kao područja s dominantnim utjecajem viskoznosti. Otpor tlaka možemo prikazati kao silu tekućine u smjeru normale na svaki dio trupa broda.

Kod katamarana je vrlo zanimljiva problemanika interferencije valova, odnosno uzajamnog djelovanja valova, i njen utjecaj na otpor čak i kod deplasmanskih formi. Naime, kod deplasmanskih formi brodova koji imaju samo jedan trup porastom brzine statička i dinamička oplakana površina vrlo se malo razlikuju. Kod poludeplasmanskih i gliserskih formi porastom brzine, odnosno Froudeovih brojeva, dolazi do stvaranja hidrodinamičkog uzgona, pa se oblik dinamičke oplakane površine mijenja u odnosu na statičku oplakanu površinu (mjerenu na mirnoj vodi), a samim time se mijenja i ukupna sila otpora, ako se ista

računa preko dinamičke oplakane površine u odnosu na onu izračunatu preko statičke oplakane površine.

Otpor valova višetrupnih brodova je manji zbog povećane vitkosti trupova pa se time nadomještava povećanje otpora trenja zbog veće oplakane površine, kao posljedice postojanja više trupova. Kod svih višetrupnih brodova javlja se interferencija valova, odnosno međusoban utjecaj valova, a najizraženija je kod trimarana (brodovi s tri trupa). Općenito govoreći, otpor višetrupnih brodova je manji pri većim brzinama u odnosu na jednotrupne brodove zbog povoljne interferencije valova pri Froudeovim brojevima $F_n > 0,5$. Pri manjim brzinama do izražaja više dolazi otpor trenja, kao najveća komponenta otpora, pa je i ukupni otpor u tom slučaju veći. Omjer duljine i širine je veći i forme su vitkije, što omogućava bržu plovidbu. Detaljniji opis faktora koji utječu na otpor katamarana dan je u slijedećim poglavljima.

U odnosu na jednotrupne brodove, kod višetrupnih se brodova jednostavnije može postići veći poprečni stabilitet što znači i bolju pomorstvenost broda, a samim time i veću sigurnost. Većinom, svi višetrupni brodovi imaju bolja svojstva pomorstvenosti od jednotrupnih. Za razliku od jednotrupnih, višetrupni brodovi imaju različite korelacije momenata inercije i uzgona što utječe na prirodne periode njihanja, a to je važno za pomorstvenost.

2.2. Otpor katamarana

Sve što je navedeno u prethodnom poglavlju o otporu primjenjivo je i na otpor katamarana, no treba imati na umu da svaki od trupova generira svoj valni sustav, za koji se može pretpostaviti da međusobno interferiraju što utječe na ukupni otpor.

Kompleksnost problematike otpora katamarana svoje razloge može naći u interferenciji valova između dva trupa te raznim faktorima koji na tu interferenciju utječu (kao npr. parametri forme i oplakana površina) o kojima će biti riječi u slijedećim poglavljima ovog rada.



Slika 2.3 Modelsko ispitivanje katamarana [5]

Interferenciju kod katamarana možemo podijeliti na dvije vrste:

1. Interferenciju uzrokovanu viskoznim efektima zbog asimetričnog strujanja oko trupova katamarana, kao i zbog postojanja graničnog sloja koji je, kako je ranije navedeno, direktno u vezi sa viskoznim otporom.
2. Interferenciju valova između dva trupa katamarana.

Valna interferencija može biti povoljna ili nepovoljna. Povoljna je poželjna, jer na taj način dva vala međusobno interferiraju i time stvaraju val manje amplitude što može imati pozitivne utjecaje na otpor na način da interferencija valova više neće imati nikakav utjecaj na ukupni otpor. Razlog tome je da će se valne amplitude sve više smanjivati do vrijednosti pri kojoj će amplituda vala u odnosu na duljinu broda biti izrazito mala, pa samim time i utjecaj tih valova interferencije na otpor će biti zanemariv.

2.3. Faktori koji utječu na otpor katamarana

2.3.1. Utjecaj parametara forme na otpor katamarana

Formu broda možemo opisati sa nekoliko parametara kao što su: omjer duljine i širine broda, omjer širine i gaza broda, zatim pomoću vitkosti trupa i sl. U ovoj točki će se usredotočiti na utjecaj omjera širine i gaza broda B/T i vitkosti trupa na otpor katamarana. Vitkost trupa predočavamo pomoću parametra M okruglo (M) koji predstavlja omer duljine i trećeg korijena istisine broda (M) = $L/\nabla^{1/3}$.

Na Sveučilištu Southampton godine 1994. [10] provedena su modelska ispitivanja katamarana u svrhu uvida utjecaja prethodno navedenih parametara na otpor borda. Modeli koji su ispitivani su izvedenice NPL forme na temelju koje su mnogi trupovi katamarana izgrađeni. NPL (*National Physical Laboratory*) forma je prvi puta predstavljena 1964. godine kao forma sa zaobljenim uzvojem predviđena za plovidbu pri brzinama u rasponu Froudeovih brojeva $F_n = 0,3-1,2$. Takva deplasmanska forma pokazala se vrlo zanimljivom za brodove koji će ploviti pri velikim brzinama, kao što su katamarani.

Mjerenja su vršena za raspon Froudeovih brojeva $F_n = 0,1-1$, tj. pri pripadajućim brzinama i Reynoldsovim brojevima. Za koeficijent ukupnog otpora katamarana je korišten izraz:

$$C_{TCAT} = (1 + \phi k) \sigma C_F + \tau C_W \quad (2)$$

gdje je:

C_F – koeficijent otpora trenja dobiven pomoću korelacijske linije model-brod ITTC 1957,

C_W – koeficijent otpora valova za svaki trup katamarana zasebno,

$(1+k)$ – faktor forme za svaki jedan trup,

ϕ – koeficijent koji uzima u obzir polje tlaka oko jednog trupa,

τ – koeficijent interferencije valova,

σ – koeficijent koji uzima u obzir povećanje ubrzanja strujanja između dva trupa katamarana.

Iz praktičnih razloga, tj. pojednostavljenja tumačenja rezultata dobivenih modelskim ispitivanjem koeficijenti ϕ i σ su povezani jednim faktorom β , koji predstavlja faktor viskoznog otpora interferencije. Uvođenjem faktora β , formula za izračun otpora katamarana jest:

$$C_{TCAT} = (1 + \beta k) C_F + \tau C_W \quad (3)$$

Rezultati mjerenja su pokazali da pri fiksnom omjeru širine i gaza broda $B/T = 0,2$ za svaki omjer S/L , pri čemu je S razmak trupova katamarana, a L duljina katamarana pokazalo se smanjenje otpora katamarana, a porast (M) . Naime, pokusi su vršeni koristeći omjere $S/L=0,2;0,3;0,4;0,5$, te su svi pokusi izvedeni sukladno tim mjerama.

Također je važno napomenuti da pri većim brzinama odmicanje trupova, tj. povećanje razmaka između njih ima vrlo malen utjecaj na otpor. Variranjem omjera širine i gaza, uz konstantnu vitkost trupa, dobivne su dvije skupine podataka. Pri visokim vrijednostima omjera vitkosti modeli s najmanjim omjerom širine i gaza pokazali su najveći koeficijent otpora, dok pri niskom (M) isti modeli su pokazali najmanji otpor preko velikog raspona Froudeovih brojeva.

Faktor interferencije β pri nižim Froudeovim brojevima pokazuje vrlo značajne oscilacije, dok pri višim ne. Pri višim omjerima S/L , odnosno kad su trupovi više udaljeni, pri većim Froudeovih brojeva omjer S/L ima vrlo malen, gotovo zanemariv, utjecaj na interferenciju kod katamarana.

2.3.2. *Utjecaj oblika trupa na otpor katamarana*

Zbog karakterističnog oblika trupa sasvim je logično zapitati se kako na otpor katamarana utječe oblik njegovog poprečnog presjeka. Kao što je objašnjeno u ranijim točkama, svaki od trupova katamarana stvara svoj valni sustav i samim time posjeduje iste komponente otpora kao i brodovi koji imaju jedan trup, no kada ta dva valna sustava dođu u kontakt dolazi do međusobnog djelovanja tih sustav što utječe na ukupni otpor. To međusobno djelovanje valnih sustava se očituje kao dodatna komponenta preostalog otpora, tj. kao otpor interferencije valova.

Interferencija valova je vrlo složena pojava koju možemo razložiti na tri komponente, a to su interferencija uslijed superpozicije valova, interferencija uslijed strujanja između trupova, te utjecaj dinamičke oplakane površine na interferenciju [6].

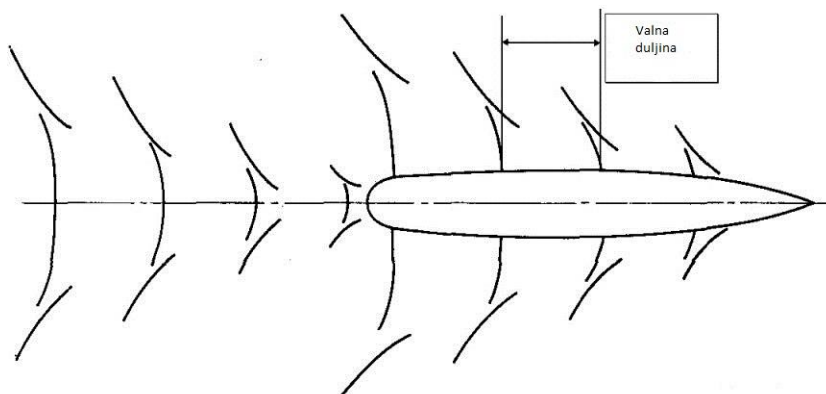
Otpor valova je vrlo teško izračunati. Jedna od metoda je i računanje otpora valova preko energije valova. Naime, valne sustave možemo metodom superpozicije prikazati kao sumu harmonijskih valova različitih značajki (amplituda vala, duljina vala i sl). Znamo da se valni sustavi u prirodi nikad neće ponoviti, no njihova energija hoće, pa je energija vala vrlo bitan

kriterij za daljnje projektiranje brodova. Energija vala je proporcionalna kvadratu amplitude vala.

Valni sustav kojeg generira plovilo možemo podijeliti na četiri komponente, a to su:

1. pramčani valni sustav,
2. sustav valova pramčanog ramena,
3. krmeni valni sustav,
4. sustav valova krmenog ramena.

Ta četiri sustava međusobno interferiraju na povoljan ili nepovoljan način, tako da utječu na promjenu energije potrebnu za održavanje tog valnog sustava. Kao što je rečeno ranije, poželjnija je povoljna interferencija, jer se njome smanjuje amplituda vala.



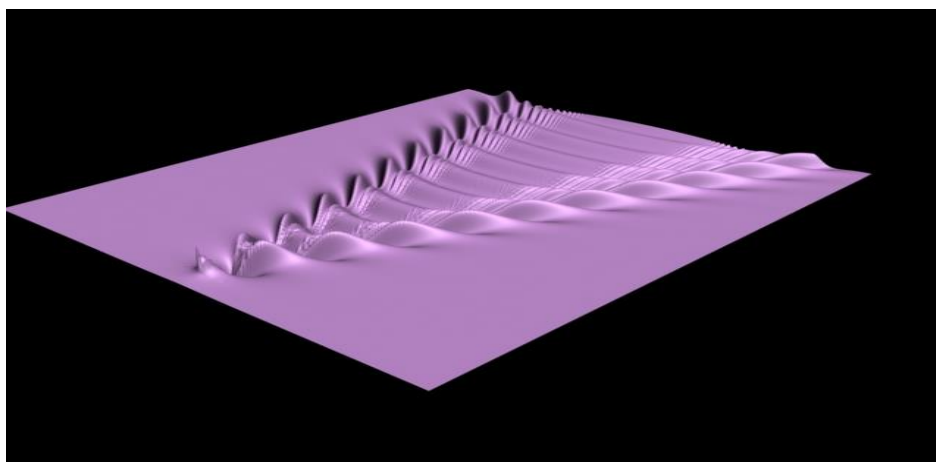
Slika 2.4. Slika valnog sustava [17]

Druga komponenta interferencije je uzrokovana strujanjem između trupova katamarana. Na tu komponentu možemo utjecati povećavanjem razmaka između trupova, jer što su trupovi bliže postavljeni jedan drugome, to je strujanje između njih sličnije strujanju u kanalu ograničene širine. Pri takvom strujanju dolazi do povećanja brzine strujanja, što utječe na povećanje tangencijalnih sila, a samim time i dovodi do promjene ukupnog otpora. Zbog povećanja strujanja dolazi do promjene otpora valova, pa se samim time mijenja i slika vala.

Treća komponenta interferencije je dinamička oplakana površina o kojoj će više riječi biti u slijedećem poglavlju.

Kao što je ranije spomenuto, kod katamarana depasmanse forme pri većim brzinama dolazi do značajne promjene dinamičke oplakane površine u usporedbi sa statičkom oplakanom površinom, te razlika između te dvije oplakane površine pri Froudeovom broju $F_n = 1$ može biti do 10%.

Godine 2011. na Webb-ovom Institutu je izvršeno modelsko ispitivanje kako bi se utvrdio utjecaj oblika trupa te izgleda poprečnog presjeka na otpor katamarana [9]. Uspoređivani su modeli NPL i semieliptične forme. Modeli su ispitivani pri Froudeovim brojevima od $F_n = 0,2-1,1$, te su korišteni omjeri $S/L = 0,2-0,4$. Rezultati su pokazali konstantan rast koeficijenta preostalog otpora smanjenjem omjera S/L , a Froudeovi brojevi, odnosno brzine, su rasle. Također, rezultati upućuju na zaključak da se smanjenjem trima znatno može utjecati na otpor katamarana, točnije može se smanjiti preostali otpor pri većim brzinama. Promjenom razmaka trupova može se utjecati na ostvarivanje dinamičkoga uzgona, a samim time i na dinamičku oplakanu površinu. Preciznije govoreći, smanjivanjem omjera S/L brzine pri kojima se stvara dinamički uzgon se smanjuju, a samim time se smanjuje i dinamička oplakana površina, a sukladno tome i strujanje između trupova što dovodi i do smanjenja otpora katamarana. Također, modelsko ispitivanje NPL i semi-eliptičnih formi je pokazalo da semi-eliptične forme imaju manji preostali otpor u usporedbi sa NPL formom, te imaju bitno manji otpor interferencije valova nego li je to slučaj kod NPL forme. Može se zaključiti da karakteristike forme i oblik trupa imaju značajan utjecaj na sliku valova koji će se stvoriti oko katamarana, a samim time i na granični sloj koji utječe na otpor katamarana, posebice na otpor interferencije valova.



Slika 2.5 Digitalni prikaz valnog sustava broda [18]

2.3.3. Utjecaj oplakane površine na otpor katamarana

Jedna od prednosti katamarana su i velike brzine pri kojima plove. Kao što je rečeno ranije, karakteristika katamarana je u tome što, iako su deplasmanske forme, pri većim brzinama dolazi do razlike između statičke i dinamičke oplakane površine. Ispitivanja su pokazala da dinamička oplakana površina pri $F_n=1,0$ može biti i do 10% veća od statičke oplakane površine, a pri $F_n=1,2$ može biti čak i 20% veća [8]. Takva razlika može značiti znatno smanjenje potrebne snage pogonskog stroja.

Jedan od problema pri određivanju otpora katamarana je i odrediti faktor forme k . Naime, stanadardan način određivanja faktora forme je koristeći Prohaskinu metodu koja nije pogodna za katamarane, jer se određuje pri niskim Froudeovim brojevima, odnosno brzinama, kako bi se mogao zanemariti otpor valova. Također, Prohaskina metoda nije prikladna za forme za krmenim zrcalom, jer pri nižim brzinama zrcalo je uronjeno, a pri većim potpuno suho. Zato se koristi preporuka ITTC-a da je za vitke duge forme $k = 0$, što znači da otpor katamarana možemo zapisati kao:

$$C_{TCAT} = C_{Fmon} + \tau C_{Wmon} \quad (4)$$

gdje je:

C_{Fmon} – otpor trenja jednog trupa,

C_{Wmon} – otpor valova jednog trupa.

Ako uzmemo u obzir da dinamička (stvarna) oplakana površina kod katamarana pri većim Froudeovim brojevima može biti i više od 15% veća od statičke oplakane površine, pa ako uvedemo dinamičku oplakanu površinu u izraz za otpor katamarana slijedi:

$$C_{TCAT} = w C_{Fmon} + \tau' C'_{Rmon} \quad (5)$$

gdje je:

τ' – koeficijent interferencije valova sa uračunatom dinamičkom oplakanom površinom,

C'_{Rmon} – koeficijent preostalog otpora ako se uračuna stvarana oplakana površina,

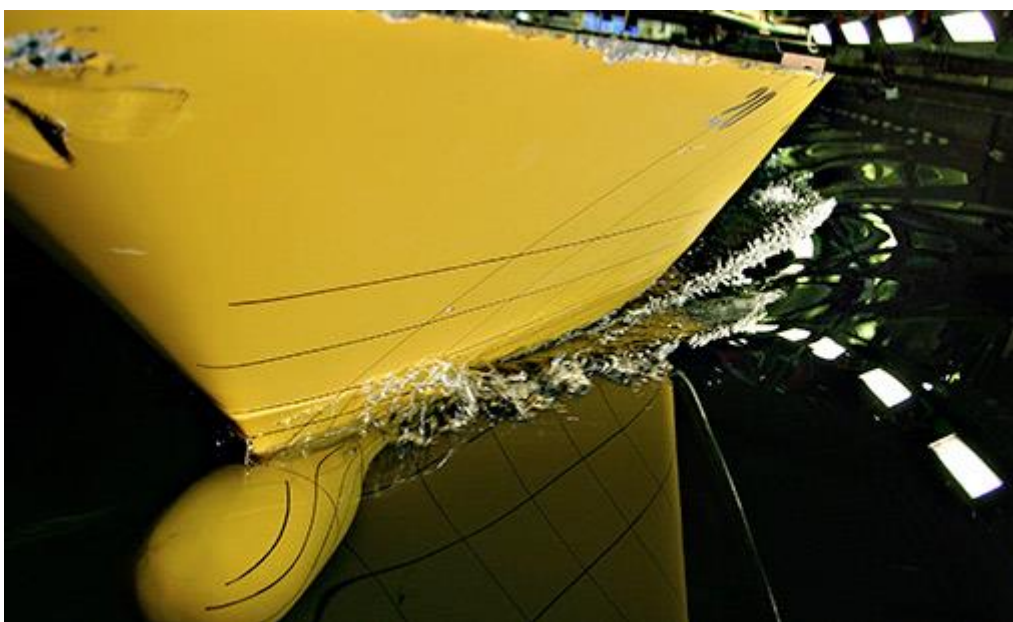
w- omjer dinamičke i statičke oplakane površine kako slijedi:

$$w = \frac{RWSA}{SWSA} \quad (6)$$

RWSA (eng. *running wetted surface area*) je dinamička, odnosno stvarna oplakana površina, dok je SWSA (eng. *static wetted surface area*) je statička oplakana površina. Ako se računa dinamička oplakana površina koeficijent preostalog otpora C_R' će biti manji nego isti računat preko statičke oplakane površine. Kako bi se dobio bolji uvid u utjecaj uključivanja dinamičke oplakane površine u proračun otpora katamarana ispitani su modeli izduljene NPL forme u interesantnom području Froudeovih brojeva ($0,2 < F_n < 1,2$) za različite omjere S/L ($S/L = 0,2; 0,3; 0,4$). Rezultati su pokazali da pri većem razmaku trupova katamarana utjecaj dinamičke oplakane površine je sličan kao i kod jednotrupnih brodova, što dovodi do zaključka da se pri takvim konfiguracijama koeficijent τ može računati na isti način i za katamarane i za jednotrupne forme. Ista logika ne vrijedi za najmanji omjer S/L gdje je dinamička oplakana površina bila veća u rasponu Froudeovih brojeva $0,6 < F_n < 0,7$. No, postoji značajna razlika u rezultatima otpora ako se on računa preko statičke oplakane površine umjesto preko dinamičke oplakane površine bez obzira na omjer S/L . Ispitivanja su pokazala da za katamaran od 25 metara pri brzini od 35 čvorova potreba za snagom je 10% manja ako se otpor računa preko dinamičke oplakane površine. Takvo smanjenje potrebne snage bi značajno smanjilo troškove goriva. Isto tako, ako se otpor računa preko dinamičke oplakane površine udio otpora trenja smanjuje se u odnosu na preostali otpor kod većih Froudeovih brojeva, što je logičan slijed uslijed promjene oplakane površine. Takvo smanjenje otpora trenja, a povećanje preostalog otpora ima za posljedicu gore spomenuto smanjenje potrebne snage motora.

3. METODE ODREĐIVANJA OPLAKANE POVRŠINE

Postoji nekoliko metoda za određivanje oplakane površine kojima je cilj zamijeniti ručni dio određivanja oplakane površine i učiniti cijeli proces maksimalno automatskim. Danas se sve više radi na razvoju efikasnih metoda određivanja oplakane površine koje bi bile jednostavne za primjenu, točne, a zahtjevale što je moguće manji utrošak radnog vremena ljudi koji se time bave.



Slika 3.6. Fotografija modelskog ispitivanja [15]

Neke od metoda su navedene u tekstu koji slijedi.

Osjetljiv premaz na modelu (eng. *Responsive Coating*)

Vrlo tanak sloj boje se nanosi uređajem za tlačno prskanje. Tegljenjem modela ispire se boja i na taj način se određuje oplakana površina. Glavni nedostatak ove metoda je vrlo visoka cijena uređaja potrebnih za rad.

Direktno mjerenje razine vode duž trupa broda (eng. *Direct measurment of water elevation along the ship hull*)

Koriste se kondenzatorske trake koje mjere visine valova duž oplata. Princip se temelji na paralelenom spoju kondenzatora, tj. njihovoj kapacitivnosti. Kako bi se osigurala točnost ove metode potrebno je postaviti više traka na nekoliko vodoravnih položaja na oplati i dnu modela ili premazati cijeli trup najprije s metalnim premazom, pa zatim izolacijskim

premazom kako bi u kontaktu s vodom nastala kondenzatorska ploča. Još jedan problem koji se javlja kod ove metode mjerenja oplakane površine jest da same trake mogu utjecati na strujanje u graničnom sloju i samim time dati netočne podatke o otporu broda. Također, trake ne razlikuju tekućinu od vodene maglice, te je sama metoda vremenski vrlo zahtjevana, jer sve trake moraju biti precizno postavljene radi maksimalne točnosti.

Određivanje oplakane površine radarom (eng. *Stereo/radar measurment*)

Teorijski i praktično vrlo primjenjiva metoda, no glavni problem kod njene primjene je instalacija na postojeću opremu kolica u bazenima za ispitivanje. Nepotrebno je naglašavati da radari daju pouzdane podatke, no rezultate dobivene mjerenjem potrebno je detaljno analizirati.

Brojanje rešetkastih ćelija (eng. *Grid Cell Counting*)

Metoda se zasniva na kreiranju rešetke na oplati broda prije testiranja, tako da se svaka ćelija rešetke oboji kako bi krajnji rezultat posjećao na šahovsku ploču. Za vrijeme testiranja fotografira se model, te procesiranjem fotografija nakon testiranja određuje se broj ćelija pod vodom, odnosno oplakana površina.

Analiziranje 2D fotografija i 3D modela (eng. *Determonation of wetted surface using image processing*)

Ova se metoda pokazala vrlo efikasnom; naime, jednostavna je za primjenu, točna te zahtjeva najmanje uloženog vremena. Metoda se temelji na analiziranju kombinacije podvodnih i nadvodnih fotografija bazenskog ispitivanja, te će više riječi o ovom načinu određivanja oplakane površine biti u slijedećem poglavlju rada.

3.1. Određivanje oplakane površine korištenjem 2D fotografija i 3D modela broda

Glavni kriterij za ocjenjivanje bilo koje metode jest njena točnost. Iako je potrebna točnost određivanja oplakane površine kod brzih brodova (poludeplasmanske i gliserske forme te katamarani) manja nego kod deplasmanske forme, greška u očitavanju je vrlo bitna informacija za predviđanje potrebne snage motora broda. Razlog potrebne manje točnosti prilikom određivanja oplakane površine brzih brodova je u tome što s povećanjem brzine raste udio

otpora valova u ukupnome otporu. Otpor valova je funkcija Froudeovog broja, dok će se netočnost u očitavanju oplakane površine izraziti samo u otporu trenja. Procijenjena pogreška prilikom određivanja oplakane površine korištenjem podvodnih i nadvodnih fotografija je 5%, što se očituje kao 0,5% netočnosti za vrijednost otpora trenja.

Za određivanje oplakane površine pomoću 2D fotografija koriste se podvodne fotografije, te nadvodne fotografije slikane s krme, pramca i boka broda. Pomoću tih fotografija se određuje vodna linija, a samim time i oplakana površina. Fotografije se procesiraju u nekom od računalnih programa za manipulaciju slikama.

Vodna linija se može odrediti i ručno, što ostavlja prostora za pojavu greške, jer točnost metode ovisi prvenstveno o iskustvu i vještini osobe koja to radi.

Drugi način očitavanja vodne linije je polu-automatski, a to je tzv. "live-wire" metoda koja se često naziva i "pametne škare". "Live-wire" je metoda koja se zasniva na algoritmu puta najmanje vrijednosti, tj. Dijkstrasovom algoritmu. Ta metoda omogućuje da korisnik ručno odabere početnu točku vodne linije, na temelju koje će algoritam odrediti najkraći put od te točke do svih sličnih piksela na fotografiji, što odgovara obliku vodne linije. Kako algoritam ne bi nasumično hvatao piksele po slici, u njega je ugrađen Sobel operator koji pronalazi prijelaze između svijetlijih i tamnijih dijelova fotografije, a zatim određuje intenzitet tog prijelaza i tako određuje rub i njegovu orijentaciju.

Najkorisnija fotografija je podvodna fotografija, jer se na njoj vodna linija najbolje vidi za određenu brzinu. Razlog korištenja i nadvodnih fotografija je u tome što je pri velikim brzinama zbog stvaranja mjehurića zraka (posebno kod V oblika rebara) teško točno odrediti vodnu liniju, a slično je i kod jako strmih dijelova forme.



Slika 3.7. Podvodna fotografija vodne linije [16]

Kad je vodna linija određena na 2D fotografijama, potrebno je istu projicirati na 3D model. Nakon određivanja perspektive kamere, proračunava se matrica projekcije i traže se njena presjecišta s točkama mreže na modelu. Pomoću tih presjecišta dobivaju se koordinate vodne linije na površini modela. Sam podatak o veličini oplakane površine dobiva se iz računalnog programa pomoću kojeg su fotografije obrađene.

4. MOGUĆI IZVORI GREŠAKA PRI MODELSKIM ISPITIVANJIMA

Proces određivanja grešaka u mjerenjima mora biti tako postavljen tako da je moguće sistematično odrediti greške u svakome koraku obrade podataka.

Pojam točnosti se odnosi na dogovor o toleranciji veličine razlike između eksperimentalno određene veličine i njene apsolutne vrijednosti. Također, točnost se povećava s time što je greška bliže nuli.

Greška jest razlika između eksperimentalno određene veličine i točne vrijednosti. Greške možemo podijeliti na dvije grupe: sistematske i slučajne greške. Sistematska greška mijenja vrijednost sistematski određenog broja mjerenja za neku određenu vrijednost te uvijek imaju isti predznak. Slučajne vrijednosti, baš kao što im i ime kaže, nisu određene veličine te svoju vrijednost mijenjaju od mjerenja do mjerenja.

4.1. Izvori grešaka

Modelskim ispitivanjem u bazenu je moguće odrediti otpor broda za svaku brzinu. No, prije analize podataka dobivenih ispitivanjem potrebno je provesti analizu mogućih izvora grešaka i odrediti njihov utjecaj na konačan rezultat.

Prema procedurama određenim od strane ITTC-a [5], mogući izvori grešaka eksperimentalnih ispitivanja su:

- 1) geometrija trupa,
- 2) brzina,
- 3) otpor,
- 4) temperatura, gustoća, viskoznost.

Sam model se izrađuje kako bi bio geometrijski sličan nacrtima ili matematičkim modelima koji opisuju oblik trupa broda u naravi. Iako se teži k tome da tehnološki procesi izrade samog modela budu što je moguće precizniji kako bi greška u obliku trupa bila što je moguće manja, niti jedan proces nije savršen. Treba imati na umu da greška pri izradi trupa ne utječe samo na veličinu oplakane površine, nego i na proračun otpora koji je usko vezan s oplakanom površinom broda.

Apsolutnu grešku u geometriji broda je teško odrediti pa se zbog toga promatraju samo sistematske greške.

Kako bismo dobili bolju sliku utjecaja greške pri izradi modela na daljnje proračune, predložimo isti kroz primjer. Naime, ako je greška $\pm 1 \mu\text{m}$ u smjeru svih koordinata trupa modela, povećanje oplakane površine iznosi 0,29 %. To povećanje se očituje i u proračunu sile otpora.

Greške kod mjerenja brzine, otpora, te viskoznosti, temperature i gustoće su gotovo uvijek posljedica kalibracije mjernih instrumenata. Kalibraciju je potrebno provesti neovisno o pokusu otpora. Brzina se mjeri pomoću rotacije metalnog kola koje ima optički senzor (čiji se binarni izraz koristi kao izvor impulsa) ili pomoću nekog drugog uređaja koji generira impuls.

Kod prikupljanja podataka tokom modelskog ispitivanja, te kasnijem analiziranju netočnosti ispitivanja radi se usporedba svih izvora i vrsta grešaka. Pri tome se analizira svaka komponenta zasebno, pridodaje joj se važnost i na kraju određuje ukupna netočnost.

Kako bismo dobili pouzdane podatke mjerenja, ITTC preporučuje da se svako ispitivanje provodi u 5 setova po 3 mjerenja brzine, što daje ukupno 15 mjernih točaka za analizu.

5. ANALIZA UTJECA GREŠKE OČITANJA OPLAKANE POVRŠINE NA VRIJEDNOST UKUPNOG OTPORA KATAMARANA

Analiziran je katamaran ispitan u Brodarskome Institutu u Zagrebu [11] .

Osnovne karakteristike modela su:

$L_{PP}= 3,888$ m	- duljina modela između perpendikulara
$B= 1,1116$ m	- širina broda
$T= 0,1322$ m	- gaz
$S= 6,574$ m ²	- oplakana površina
$\nabla= 0,3696$ m ³	- volumen istisnine
$C_B= 0,6111$	- koeficijent punoće forme

Model je izrađen od drva (vodootporna šperploča) i poliuretanske pjene u mjerilu $\lambda=9$.

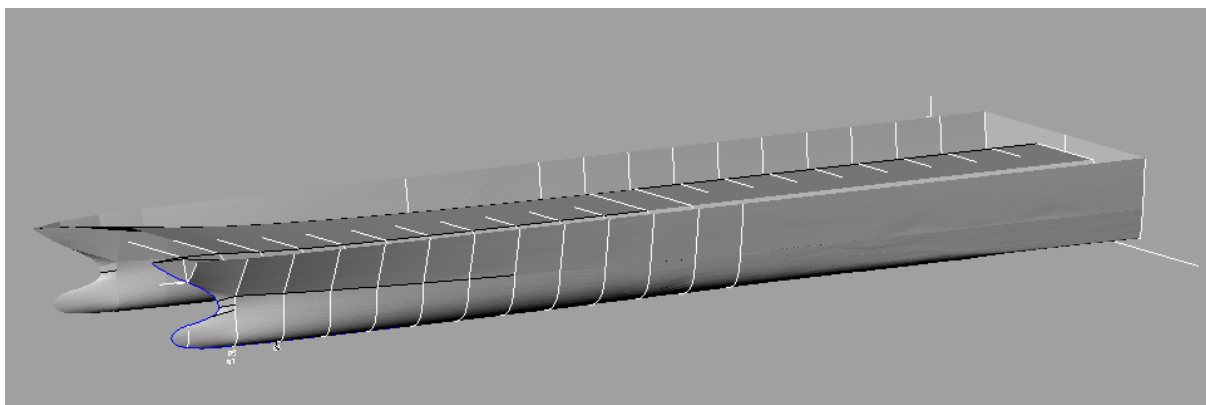
Model broda tegljen je kolicima vučnom silom položenom u smjeru djelovanja poriva. Pri konstantnoj brzini tegljenja, mjerena je sila tegljenja, kut trima u plovidbi, te uron i izron, odnosno vertikalni pomak težišta istisnine. Tokom pokusa model je sniman video kamerom. Pomoću fotografija dobivenih snimanjem modela tokom pokusa, dobiveni su podaci za određivanje dinamičkih oplakanih površina pomoću kojih je proveden proračun otpora.

Za stimuliranje turbulencije korištena je žica promjera 1 mm smještena duž konture pramca modela katamarana.

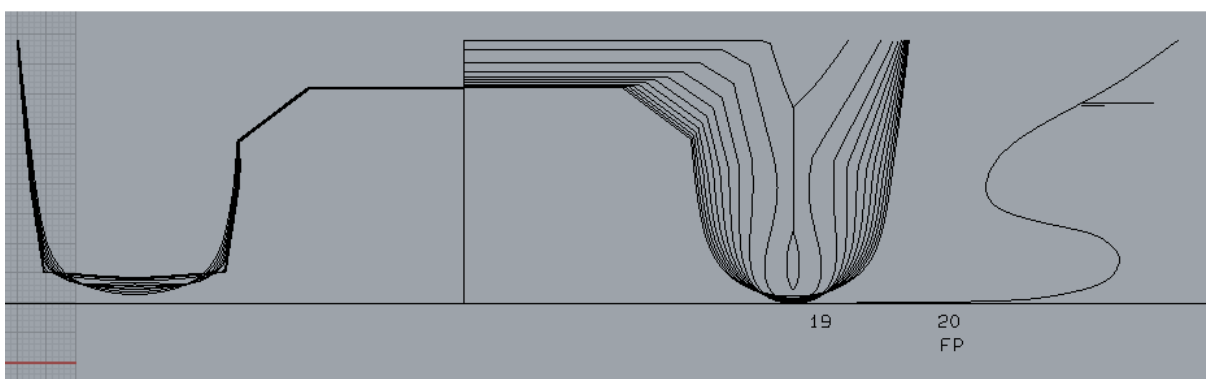
Na temelju nacrtu rebara [11], generiran je 3D model pomoću programa Rhinoceros 5.0. Nakon što su u prostoru modelirana sva rebra modela, generirane su 3D plohe koje ih povezuju.

Trup ima U oblik rebara, pramčani bulb i ravno krmeno zrcalo. Potrebno je poznavati tok strujanja na takvoj krmi, jer zbog diskontinuiteta strujanja može doći do vrtloženja i odvajanja strujanja. Pri velikim brzinama, kod brzih brodova s takvom formom krmeno zrcalo je gotovo cijelo iznad površine vode, te dolazi do tzv. „čistog odvajanja strujanja“. Daljnji proračun se temelji na toj pretpostavci.

Prikaz 3D modela izrađenog u programu Rhinoceros 5.0 prikazan je na slici 5.8., a nacrt rebara na slici 5.9.



Slika 5.8. Prikaz 3D modela katamarana



Slika 5.9. Nacrt rebara modela [11]

5.1. Određivanje vodne linije

Pomoću fotografija snimljenih za vrijeme ispitivanja u bazenu za određenu brzinu, ručno je određena vodna linija, te je projicirana na 3D model tako da je fotografija učitana u program Rhinoceros 5.0 kako bi se model katamarana postavio u točnu perspektivu fotografije s ispitivanja.

Oplakana površina je očitana pomoću naredbe „*Surface Area*“. Na slici 5.10. prikazana je fotografija modelskog ispitivanja pri brzini $v_M = 6,001$ m/s koja je korištena za očitavanje vodne linije te kasniju projekciju iste na model.



Slika 5.10. Fotografija modelskog ispitivanja pri brzini od 6,001 m/s [11]

Za tu brzinu je razmatran utjecaj pogreške očitavanja oplakane površine tako da je sustavno varirano očitavanje pomicanjem vodne linije u vertikalnom smjeru, te je isti postupak ponovljen za pomicanje samo pramčanog dijela vodne linije kako bi se utvrdio utjecaj greške očitavanja uslijed nejasne slike zbog pojave vodene prašine.

Sva pomicanja vodne linije, kako cijele, tako i samo pramčanog dijela vodne linije su izvršene tako da je variran samo unutarnji dio vodne linije, dok je vanjska vodna linija, odnosno vodna linija na vanjskome boku oplake je identična onoj koja je očitana s fotografije modelskog ispitivanja. Unutarnja vodna linija je dobivena tako da je vanjska vodna linija preslikana na unutarnji dio trupa pomoću naredbe „*Mirror*“.

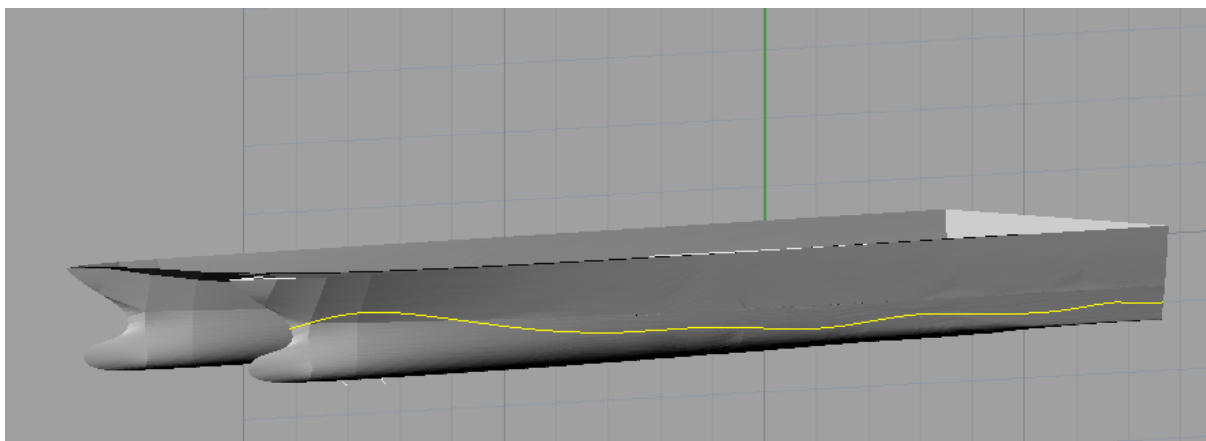
5.2. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine modela broda

5.2.1. Sustavno variranje očitavanja cijele vodne linije

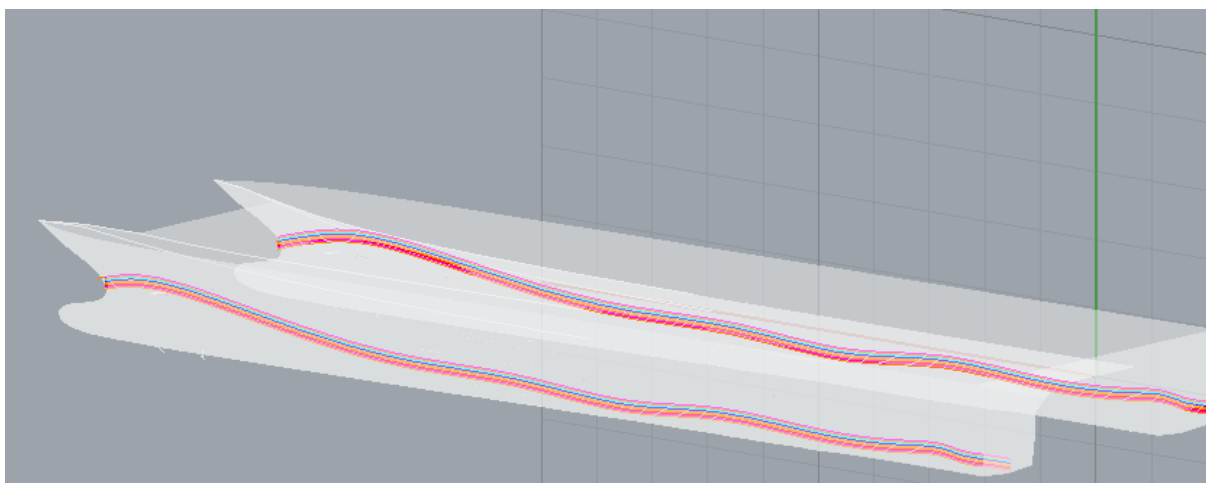
Promatran je slučaj otpora broda za brzinu od $v_M=6,001$ m/s, koja odgovara brzini broda u naravi od $v_S=18,004$ m/s, odnosno $v_S=35$ čv.

Sila otpora pri toj brzini izmjerena u bazenu za vrijeme modelskog ispitivanja iznosi $R_{TM}=277,11$ N.

Nakon što je model izrađen u programu Rhinoceros 5.0 pomoću nacrtu rebara [11], vodna linija je određena i projicirana na 3D model, što je vidljivo na slici 5.11, te zatim sustavno pomicanja u vertikalnome smjeru za ± 10 mm, što je vidljivo na slici 5.12.



Slika 5.11. Očitana vodna linija na 3D modelu katamarana



Slika 5.12. Prikaz pomaknutih vodnih linija po oplati katamarana

Vodna linija očitana s fotografije, prije variranja, pretpostavljena je kao točna vodna linija koja nastaje pri promatranoj brzini. Pomoću tog očitavanja određena je oplakana površina (uz odstupanje od +2,5%), koja je odabrana kao referentna, tj. ona koja odgovara sili ukupnog otpora broda dobivenu na temelju modelskog ispitivanja. Za potrebe proračuna varirana je samo unutarnja vodna linija, dok je vanjska vodna linija ostavljena konstantnom.

Uz konstantnu brzinu modela i silu otpora izmjerenu za vrijeme modelskog ispitivanja za "mjerodavnu" oplakanu površinu, izračunat je i koeficijent ukupnoga otpora modela. Potom je isti koeficijent izračunat za svaki pomak vodne linije, odnosno za svako očitavanje oplakane površine. Zatim su za svako to očitavanje određene apsolutne i postotne vrijednosti odstupanja koeficijenta ukupnog otpora u odnosu na referentnu vrijednost istog koeficijenta.

Odstupanja su izračunata prema:

$$p_a = x_{mj} - x_p \quad (7)$$

p_a – apsolutna greška očitavanja,

x_{mj} – očitana vrijednost,

x_p – referentna vrijednost.

Postotnu greška je izračunata prema:

$$p_a = \frac{(x_{mj} - x_p)}{x_p} 100\% \quad (8)$$

"Mjerodavni" koeficijent ukupnog otpora određen je prema:

$$C_{TM0} = \frac{R_{TM0}}{0,5\rho V_M^2 S_M} \quad (9)$$

gdje je:

R_{TM0} – sila otpora dobivena modelskim ispitivanjem, N,

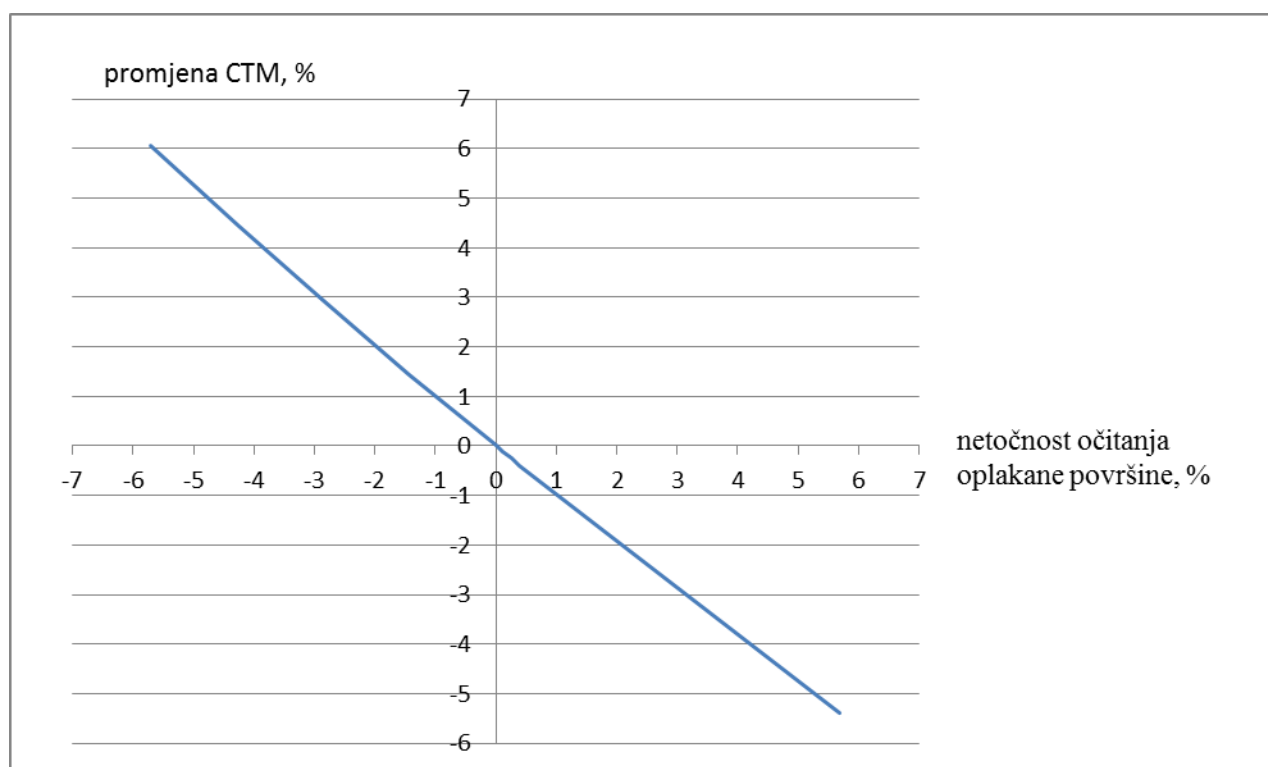
S_M – oplakana površina određena pomoću referentne vodne linije, m²,

v_M – brzina modela broda pri zadanoj brzini, m/s.

Rezultati proračuna dani su u tablici 5.1, a grafički su prikazani na slici 5.13.

Tablica 5.1. Utjecaj netočnosti očitavanja oplakane površine na izračun ukupnog koeficijenta otpora za $v_M=6,001$ m/s

greška očitavanja vodne linije [mm]	S [m ²]	Postotna greška S [%]	Apsolutna greška $C_{TM} \cdot 1000$	Postotna greška C_{TM} , [%]
10	3,563	-0,0068	0,5361	-5,0673
7,5	3,419	-4,0485	0,4056	-3,7869
5	3,467	-2,7012	0,2731	-2,5187
2,5	3,515	-1,3525	0,1377	-1,2544
0	3,563	0,0000	0,0000	0,0000
-2,5	3,371	-5,3946	-0,1404	1,2470
-5	3,371	-5,3946	-0,2833	2,4849
-7,5	3,371	-5,3946	-0,4287	3,7132
-10	3,371	-5,3946	-0,5766	4,9314



Slika 5.13. Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja oplakane površine na izračun koeficijenta ukupnog otpora za $v_M=6,001$ m/s

Na slici 5.13. je vidljivo da je promjena koeficijenta ukupnog otpora gotovo linearna u odnosu na očitano oplakanu površinu. Također je vidljivo da s povećanjem oplakane površine, vrijednosti koeficijenta ukupnog otpora su u opadanju, što je razumljivo ako uzmemo u obzir da su te dvije veličine obrnuto proporcionalne. Primjerice, greška u očitavanju oplakane površine od +1%, rezultirati će greškom od -1% vrijednosti koeficijenta ukupnoga otpora modela.

5.2.2. Sustavno variranje očitavanja pramčanog dijela vodne linije

Pri većim brzinama, odnosno Froudeov broj koji iznosi $F_n > 0,5$ značajno se povećava mogućnost pojave vodene prašine, zbog toga je potrebno uzeti u obzir i otpor vodene prašine (eng. *Spray resistance*) kao relevantnu komponentu pri proračunu ukupnoga otpora. Kod sporijih brodova, ovaj dio otpora se zanemaruje.

Otpor vodene prašine možemo podijeliti na dvije komponente, a to su otpor trenja i otpor tlaka vodene prašine:

$$R_S = R_{SP}(F_n) + R_{SF}(R_n, W_b) \quad (9)$$

gdje je:

R_S – otpor vodene prašine, N,

R_{SP} – otpor tlaka vodene prašine, N,

R_{SF} – otpor trenja vodene prašine, N.

Otpor tlaka vodene prašine je funkcija Froudeovog broja, dok je otpor trenja funkcija Reynoldsovog i Weberovog broja, definiranoga kao:

$$W_b = \frac{\rho v_{sr}^2 d_{sr}}{T_s} \quad (10)$$

gdje je:

v_{sr} - brzina vodene prašine, m/s,

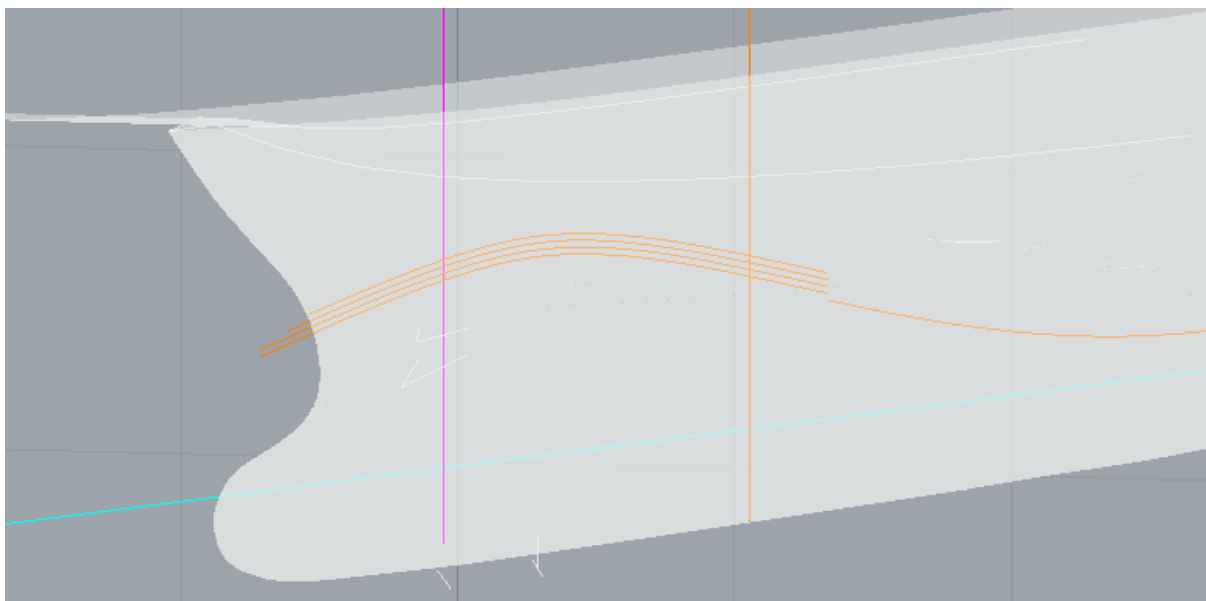
d_{sr} – debljina vodene prašine, m,

T_s – napetost slobodne površine, N/m.

Vodena prašina nastaje uslijed velikog tlaka koji djeluje na pramčani dio trupa pri velikim brzinama plovidbe. Opor trenja vodene prašine posljedica je utjecaja vodene prašine na nadvodni dio trupa i taj dio otpora je teško odrediti, jer je nepoznat koeficijent otpora trenja vodene prašine. Moguće ga je, doduše, izračunati ispitivanjem broda u naravi, odnosno modelskim ispitivanjem u mjerilu 1:1.

Komponentu otpora trenja vodene prašine moguće je smanjiti ugradnjom tzv. „deflektora vodene prašine“ koji se ugrađuju po cijeloj dužini trupa, nastojeći na taj način odvojiti vodenu prašinu od trupa i tako smanjiti oplakanu površinu. Nedostatak ugradnje takvih deflektora jest u tome što se u slučaju postavljanja istih, pojavljuje još jedna komponenta otpora, točnije otpor samih deflektora.

Kako bi se odredio utjecaj netočnosti očitavanja pramčanog dijela vodne linije, čiji oblik može biti nejasan zbog pojave vodene prašine pri većim brzinama, vertikalno je pomican samo pramčani dio vodne linije do dva rebra iza pramčanog perpendikulara.



Slika 5.14. Variranje vodne linije na pramcu

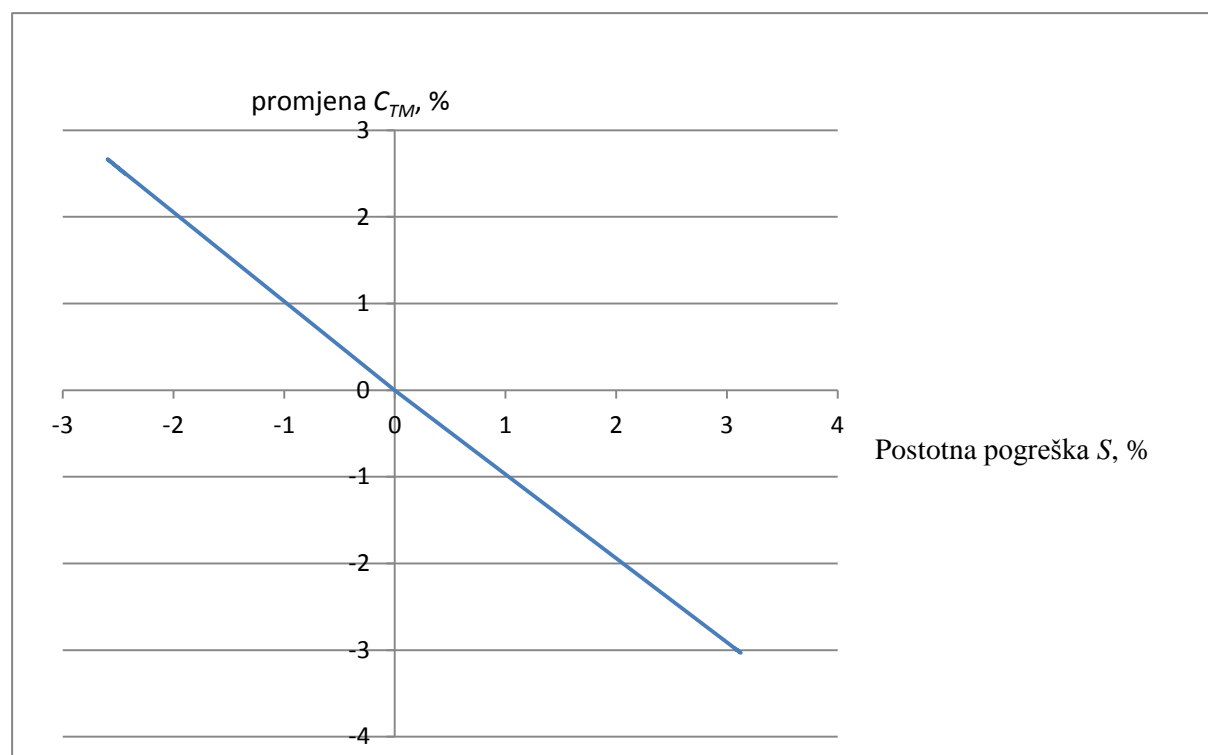
Na isti način kako je proveden proračun za variranje cijele vodne linije, odnosno kako je u prijašnjoj točki objašnjen postupak određivanja apsolutnog i postotnog odstupanja, tako je proveden proračun za vertikalno pomicanje pramčane vodne linije. Također, i pri vertikalnom

variranju pramčanog dijela vodne linije za ± 10 mm, pomican je samo unutarnji dio vodne linije.

Podatci proračuna prikazani su u Tablici 5.2, a grafički prikaz je dan na slici 5.15

Tablica 5.2. Utjecaj netočnosti očitavanja pramčane oplakane površine na izračun ukupnog koeficijenta otpora za $v_M=6,001$ m/s

greška očitavanja vodne linije [mm]	S [m ²]	Postotna greška S [%]	apsolutna greška $C_{TM} \cdot 1000$	postotna greška C_{TM} [%]
10	3,673	3,0995	-0,1301	-3,0064
7,5	3,672	3,0739	-0,1290	-2,9823
5	3,673	3,0993	-0,1301	-3,0062
2,5	3,674	3,1240	-0,1311	-3,0294
0	3,563	0,0000	0,0000	0,0000
-2,5	3,470	-2,5961	0,1153	2,6653
-5	3,472	-2,5428	0,1129	2,6092
-7,5	3,474	-2,4897	0,1105	2,5533
-10	3,476	-2,4371	0,1081	2,4979



Slika 5.15. Grafički prikaz utjecaja netočnosti očitavanja pramčanog dijela oplakane površine na izračun ukupnog koeficijenta otpora za $v_M=6,001$ m/s

Kao i kod grafičkog prikaza koeficijenta ukupnog otpora za variranje cijele vodne linije, tako i kod variranja samo pramčanog dijela vodne linije, promjena koeficijenta ukupnog otpora jest linearna u odnosu na očitano oplakanu površinu. Tako primjerice za odstupanje oplakane površine od 5% nastupa odstupanje koeficijenta ukupnog otpora modela od -5%, kao što je spomenuto ranije, oplakana površine i koeficijent ukupnog otpora modela su obrnuto proporcionalne veličine, pa takav trend ne treba čuditi.

5.3. Preračunavanje podataka s modela na brod

Glavni cilj proračuna otpora modela broda jest preračunavanje rezultata za brod u naravi kako bi se mogle odrediti hidrodinamičke karakteristike broda, kao i potrebna snaga. Preračunavanje podataka vršimo pomoću zakona Froudeove sličnosti, pomoću koje dobivene podatke za model broda, preračunavamo na brod u naravi.

Proračun započinjemo proračunom koeficijenta otpora trenja C_F modela prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC 1957:

$$C_{FM} = \frac{0,075}{(\log R_{nM} - 2)^2} \quad (12)$$

gdje je:

R_{Nm} – Reynoldsov broj za model,

C_{FM} – koeficijent otpora trenja modela.

Reynoldsov broj je određen na temelju podataka o modelu i fizikalnim svojstvima tekućine u bazenu.

Kada imamo izračunat koeficijent otpora trenja, izračuna se koeficijent preostalog otpora C_R koji je identičan i za model i za brod u naravi.

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM} \quad (13)$$

gdje je C_{TM} koeficijent ukupnog otpora modela definiran za svako očitavanje vodne linije, odnosno za svaku varijaciju oplakane površine.

Prema Froudeovom zakonu sličnosti vrijedi:

$$C_{RM} = C_{RS} \quad (10)$$

gdje je C_{RS} koeficijent preostalog otpora za brod u naravi.

Modelskim ispitivanjem koristimo fizički model broda, pa je potrebno fizičke veličine izmjerene na modelu preračunati za brod u naravi. Da bi to bilo moguće, potrebno je ustanoviti određene zakone za prenošenje rezultata na brod u naravi. Kako bi se izmjerene veličine mogle preračunati sa modela na brod u naravi što točnije, potrebno je osigurati fizikalnu sličnost koja se sastoji od:

1. geometrijske sličnosti,
2. kinematičke sličnosti,
3. dinamičke sličnosti.

Geometrijska sličnost podrazumijeva množenje geometrijskih karakteristika modela s odgovarajućim koeficijentom kako bi se dobile izmjere broda u naravi. Kinematička sličnost podrazumijeva da odgovarajuće točke modela i broda u naravi opisuju odgovarajuće putanje u odsječcima vremena koje su u konstantnom odnosu. Dinamička sličnost će biti osigurana ako su vektori sila u odgovarajućim prostorno vremenskim točkama istog smjera, međusobno su paralelni, te su im veličine u konstantnom odnosu.

Na temelju mjerila geometrijske sličnosti λ , uz jednakost Froudeovih brojeva ($F_n = \text{idem}$), određena je brzina broda u naravi, te duljina broda kako bi se odredio Reynoldsov broj za brod:

$$v_S = v_M \sqrt{\lambda} \quad (15)$$

$$L_S = L_M \lambda \quad (16)$$

Za izračun Reynoldsovog broja su pretpostavljeni standardni uvjeti za 15°C ($\nu=1,1883 \cdot 10^{-6}$ m²/s, $\rho=1025,87$ kg/m³).

Reynoldsov broj za brod je izračunat kao:

$$R_{nS} = \frac{v_s L_s}{\nu_s} \quad (17)$$

gdje je:

ν_s – koeficijent kinematičke viskoznosti morske vode, m²/s,

L_s – duljina broda u naravi, m,

v_s – brzina broda u naravi, m/s.

Koeficijent otpora trenja broda, kao i za koeficijent otpora trenja modela, C_{FS} , izračunat je prema korelacijskoj liniji model-brod ITTC 1957, odnosno:

$$C_{FS} = \frac{0,075}{(\log R_{nS} - 2)^2} \quad (18)$$

Na temelju izračunatih veličina koeficijenata otpora trenja broda, te preostalog otpora broda, izračunat je koeficijent ukupnog otpora broda u naravi, C_{TS} , uz konstantan korelacijski dodatak uslijed hrapavosti površine, ΔC_T .

$$C_{TS} = C_{FS} + C_R + \Delta C_T \quad (19)$$

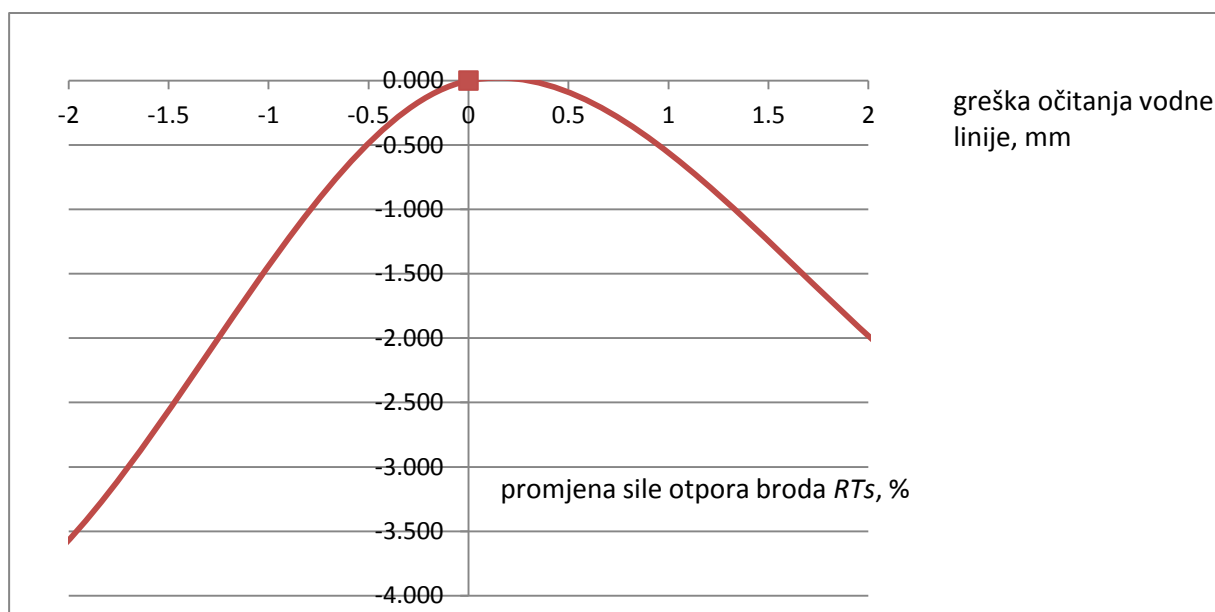
Kako bismo izračunali silu ukupnog otpora trenja, R_{TS} , za brod u naravi, potreban nam je podatak za oplakanu površinu broda S_S , koja se izračuna pomoću izmjerenih vrijednosti oplakane površine modela, S_M . Kao i koeficijent ukupnog otpora trenja i sile ukupnog otpora su izračunate za svaku varijaciju vodne linije na modelu, pa pomoću odgovarajućeg mjerila preračunane na brod.

$$S_S = S_M \lambda^2 \quad (20)$$

Ukupni otpor broda računa se prema:

$$R_{TS} = 0,5 S_S v_S^2 \rho_s C_{TS} \quad (21)$$

Podatci za proračun otpora broda pri $v_S = 35$ čvorova dani su u tablici 5.3. za proračun variranja cijele vodne linije. U tablici 5.4 su dani podatci za izračun ukupnog otpora broda pri variranju samo pramčanog dijela vodne linije. Na slici 5.16. dan je grafički prikaz variranja cijele vodne linije, a na slici 5.17 dan je grafički prikaz variranja samo pramčanog dijela vodne linije.



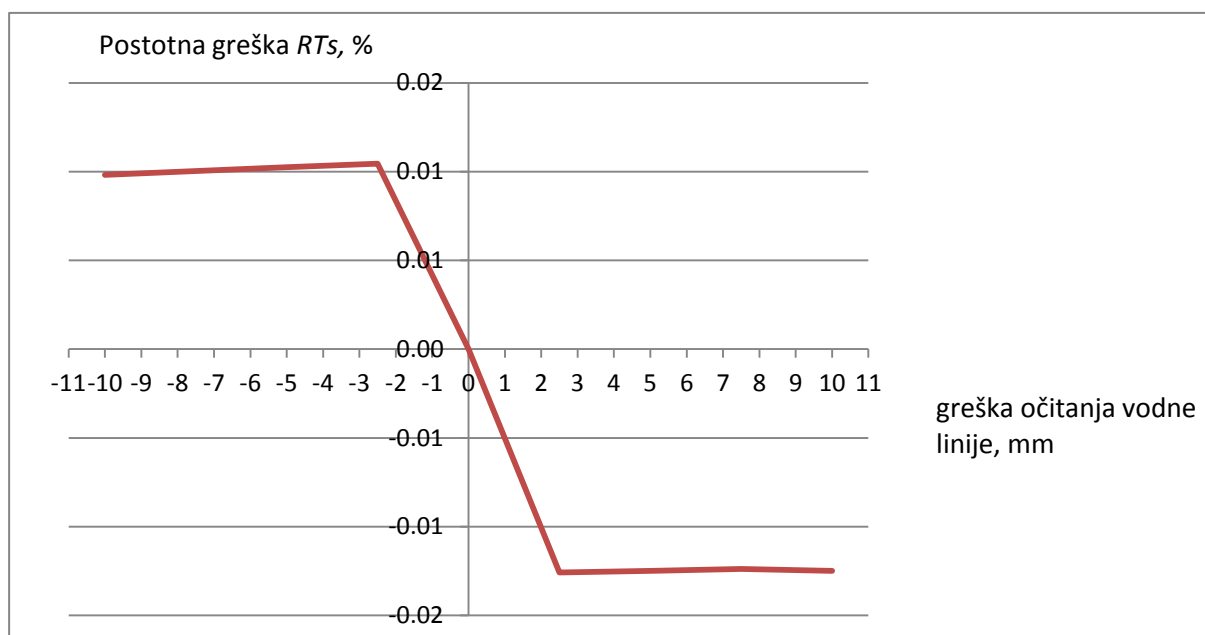
Slika 5.16. Ovisnost promjene sile otpora u odnosu na netočnost očitavanja oplakane površine

Tablica 5.3 Proračun sile ukupnog otpora broda za variranje cijele vodne linije

greška očitavanja vodne linije [mm]	S [m ²]	Postotna greška S [%]	Apsolutna greška $C_{TS} \cdot 1000$	Postotna greška C_{TS} [%]	Apsolutna greška R_{TS} [N]	Postotna greška R_{TS} [%]
10	288,578	5,6951	0,0103	-5,2217	2206,92	0,4499
7,5	274,098	0,3915	0,0104	-3,9008	-16566,61	-3,3775
5	273,722	0,2541	0,0105	-2,5935	-11184,59	-2,2803
2,5	273,366	0,1235	0,0107	-1,2911	-5654,38	-1,1528
0	273,029	0,0000	0,0108	0,00	0,00	0,00
-2,5	269,144	-1,4229	0,0109	1,2826	-696,95	-0,1421
-5	265,255	-2,8470	0,0111	2,5550	-1470,15	-0,2997
-7,5	261,363	-4,2726	0,0112	3,8166	-2325,36	-0,4741
-10	257,460	-5,7022	0,0114	5,0669	-3282,54	-0,6692

Tablica 5.4 Proračun ukupnog otpora broda za variranje samo pramčanog dijela vodne linije

greška očitavanja vodne linije [mm]	S [m ²]	Postotna greška S [%]	Apsolutna greška $C_{TS} \cdot 1000$	Postotna greška C_{TS} [%]	Apsolutna greška R_{TS} [N]	Postotna greška R_{TS} [%]
10	297,543	3,0995	0,0042	-3,1124	-25,82	-0,0125
7,5	297,469	3,0739	0,0042	-3,0867	-25,60	-0,0124
5	297,542	3,0993	0,0042	-3,1122	-25,81	-0,0125
2,5	297,613	3,1240	0,0042	-3,1370	-26,02	-0,0126
0	288,597	0,00	0,0043	0,00	0,00	0,00
-2,5	281,105	-2,5961	0,0044	2,6063	21,62	0,0105
-5	281,259	-2,5428	0,0044	2,5528	21,18	0,0102
-7,5	281,412	-2,4897	0,0044	2,4995	20,74	0,0100
-10	281,564	-2,4371	0,0044	2,4466	20,30	0,0098



Slika 5.17 Grafički prikaz utjecaja greške očitavanja oplakane površine na silu ukupnog otpora broda pri variranju samo pramčanog dijela vodne linije

Rezultati proračuna su pokazali da se pri većoj brzini plovidbe, veličina oplakane površine naglo mijenja, što ima direktne posljedice na proračun ukupnoga otpora. Tako se pri najvećim pomacima vodne linije (± 10 mm na modelu, odnosno ± 90 mm na brodu) primjećuju najveće promjene sile otpora.

Utjecaj vodene prašine se može smatrati gotovo linearnim u odnosu na oplakanu površinu, osim u dijelu najmanjih vertikalnih pomaka vodne linije gdje je vidljiv skok rezultata u odnosu na trend ostalih.

Pri pomicanju cijele vodne linije možemo uočiti da je za sve vertikalne pomake vodne linije, pozitivne i negativne, sila ukupnog otpora manja od referentne. Razlog tome je taj što koeficijent preostalog otpora C_R raste u odnosu na koeficijent trenja broda C_F . Kao što je objašnjeno u prethodnim poglavljima rada, koeficijent preostalog otpora se, među ostalim, sastoji od koeficijenta otpora valova, a kod katamarana je prisutna i komponenta otpora uslijed interferencije valova. Ta činjenica objašnjava zašto se neovisno o vertikalnim pomacima vodne linije, sila ukupnog otpora broda smanjuje. Naime, zbog velikih pramčanih valova dolazi do povoljne interferencije pramčanih valova zbog dovoljno razmaknutih trupova, odnosno povoljnog odnosa S/L . Također, vidljivo je da smanjeni otpor znači i smanjene potrebe za snagom broda što kao krajnji rezultat ima i smanjenu potrošnju goriva.

Eventualne greške očitavanja neće se u većoj mjeri odraziti na sam proračun otpora, jer preostali otpor sačinjava preko 60% ukupnog otpora, odnosno preostali otpor je veći u odnosu na otpor trenja na kojeg bi utjecale eventualne pogreške očitavanja vodne linije, a samim time i proračun oplakane površine.

Kao što je priloženo kod podataka proračuna koeficijenta ukupnog otpora modela broda, C_{TM} linearno prati promjenu oplakane površine, što je trend kojeg također možemo primijetiti prije i nakon „skoka“ koeficijenta ukupnog otpora broda pri manjim pomacima vodne linije pri variranju samo pramčanog dijela vodne linije.

Ukupna sila otpora prati trend oplakane površine, tj. s povećanjem oplakane površine, raste i sila ukupnog otpora.

Također, podatak o porastu preostalog otpora ukazuje da problematika interferencije valova kod katamarana nije zanemariva pojava, te da ima utjecaj na proračun ukupnog otpora broda, a samim time i na proračun potrebne snage broda o čemu će biti riječi u slijedećem poglavlju.

5.4. Proračun snage broda u naravi za varirane vrijednosti sile ukupnog otpora broda

Jedan od ciljeva proračuna otpora broda je i izračun potrebne snage broda koja je u direktnoj poveznici s izračunom sile ukupnog otpora broda.

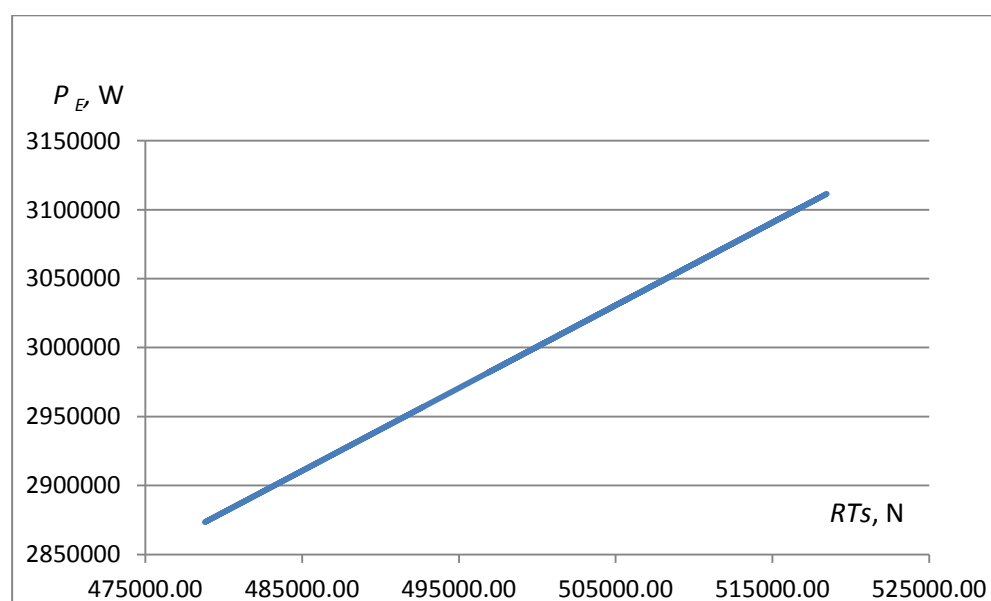
Efektivna snaga broda P_E , izračunata je za svaku vrijednost sile ukupnog otpora R_{TS} , dobivene variranjem vodne linije. Za mjerodavnu brzinu broda v_S , uzeta je brzina od 35 čvorova za koju je i proveden proračun ukupne sile otpora. Brzina broda je uzeta kao konstantna. Efektivna snaga je računata prema jednađbi:

$$P_E = R_{TS} \cdot v_S \quad (22)$$

U tablici 5.5 dan su prikazane potrebne efektivne snage dobivene za variranje sile ukupnog otpora broda.

tablica 5.5. Proračun potrebne snage za sile ukupnog otpora broda dobivene variranjem cijele vodne linije

greška očitavanja vodne linije, [mm]	R_{TS} [N]	P_E [W]	apsolutna greška P_E , [W]	postotna greška P_E , [%]
10	496119,53	2977378,663	33737,2666	1,1461
7,5	473931,29	2844219,675	-99421,72162	-3,3775
5	479313,31	2876518,946	-67122,45081	-2,2803
2,5	48544139	2913295,592	-30345,80433	-1,0309
0	490497,90	2943641,397	0,00	0,00
-2,5	489800,95	2939458,775	-4182,621222	-0,1421
-5	489027,75	2934818,547	-8822,849397	-0,2997
-7,5	488172,54	2929686,144	-13955,25294	-0,4741
10	487215,36	2923941,764	-19699,63244	-0,6692

**Slika 5.18. Grafički prikaz potrebne snage u ovisnosti o ukupnoj sili otpora broda dobivenu variranjem cijele oplakane površine**

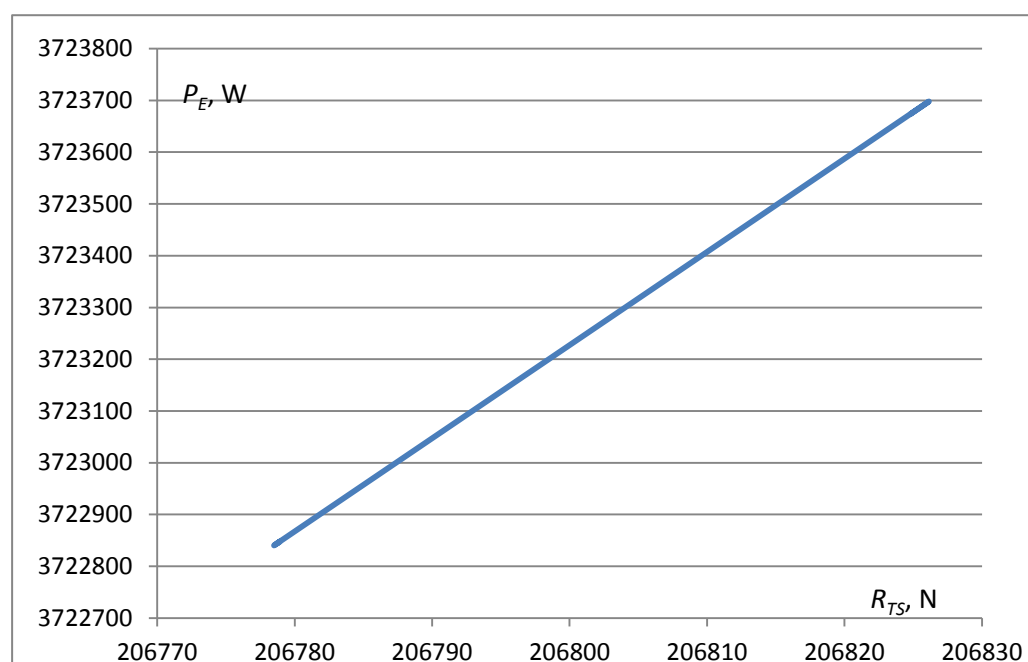
Kao što je vidljivo iz tablice 5.5, te sa slike 5.19 odnos potrebne snage i ukupne sile otpora je linearan. Štoviše, što više raste greška očitavanja vodne linije, a samim time i oplakana površina, potrebe za snagom broda u naravi se smanjuju. Takvi rezultati nas dovode do zaključka da dinamička oplakana površina ima velik utjecaj na proračun otpora, a samim time

i izračun potrebne snage broda, te može dovesti do smanjene potrebne snage od 4%, što nije zanemariva ušteda pri projektiranju broda.

U tablici 5.6 dan je prikaz proračuna potrebne snage broda za silu ukupnog otpora dobivenu variranjem samo pramčanog djela vodne linije, a na slici 5.19. dan je grafički prikaz ovisnosti snage o sili ukupnog otpora dobivenoj vertikalnim pomicanjem pramčanog dijela vodne linije.

Tablica 5.6. Proračun potrebne snage za sile ukupnog otpora dobivene variranjem samo pramčanog djela vodne linije

greška, [mm]	R_{TS} , [N]	P_E , [W]	apsolutna greška P_E	Postotna greška P_E , [%]
10	206778,7	3722843,725	-464,8	-0,0125
7,5	206778,92	3722847,566	-460,939	-0,0124
5	206778,71	3722843,758	-464,747	-0,0125
2,5	206778,49	3722840,053	-468,452	-0,0126
0	206804,52	3723308,505	0,00	0,00
-2,5	206826,14	3723697,796	389,291	0,0105
-5	206825,69	3723689,803	381,299	0,0102
-7,5	206825,25	3723681,842	373,337	0,0100
-10	206824,81	3723673,943	365,439	0,0098



Slika 5.19. Grafički prikaz ovisnosti snage o sili ukupnog otpora dobivene variranjem samo pramčanog dijela vodne linije

Kao što je vidljivo, promjena snage linearno prati promjenu sile ukupnog otpora broda, no vidljivo je, također, da značajnije uštede snage možemo očekivati pri većim promjenama oplakane površine, čemu u prilog ide i usporedba rezultata dobivene potrebne snage za ukupnu silu otpora broda ako je ista računata variranjem cijele unutarnje vodne linije, u odnosu na snagu računatu preko ukupne sile otpora dobivene variranjem pramčanog dijela vodne linije. Kako je variranjem samo pramčanog dijela vodne linije promjena oplakane površine manja u odnosu na isti taj pomak pri variranju cijele vodne linije, može se zaključiti da manje promjene oplakane površine, odnosno vodne linije ne utječu značajnije na smanjenje potrebe za snagom.

Proračun snaga pomoću sile otpora dobivenih variranjem vodne linije je ukazao da je pretpostavka o smanjenim potrebama za snagom bila točna ako se za proračun otpora koristi stvarna, odnosno dinamička oplakana površina, te se na taj način mogu očekivati značajnije uštede snage.

6. ZAKLJUČAK

Oplakana površina jest važan parametar za proračun ukupnog otpora broda, a samim time i proračun potrebne snage broda. Dinamička, odnosno stvarna oplakana površina ima značajan utjecaj na proračun ukupne sile otpora broda i znatno se razlikuje u odnosu na statičku oplakanu (mjerenu na mirnoj vodi) brzih brodova, jer sa povećanjem brzine plovidbe broda dolazi do stvaranja hidrodinamičkog uzgona, pa se i oblik oplakane površine mijenja u odnosu na onu mjerenu na mirnoj vodi. Ta promjena ima izravne posljedice na proračun sile ukupnog otpora broda, a samim time i na izračun potrebne snage broda. Kako bi proračun otpora broda bio što točniji, potrebno je stvarnu oplakanu površinu što preciznije odrediti.

Uobičajena metoda analize fotografija snimljenih tokom modelskog ispitivanja daje zadovoljavajuće rezultate, no također ukazuje da je za što točnije podatke potrebno vrlo precizno očitavanje vodne linije i kvalitetne snimke oplakane površine, kako bi se što točnije vodna linija mogla preslikati na 3D računalni model, doduše relativno manje pogreške pri očitavanju vodne linije ne utječu značajnije na rezultate. Precizno očitavanje vodne linije je moguće postići brojnim algoritmima i računalnim programima koji su danas dostupni na tržištu, ali i ovisi o iskustvu osobe koja očitavanje izvršava.

Kod katamarana porast oplakane površine za posljedicu ima smanjenje koeficijenta ukupnog otpora broda, a samim time i smanjenje sile ukupnog otpora broda, što je logična posljedica povećanja udjela preostalog otpora naspram otpora trenja u ukupnome otporu. Preciznije govoreći, uz povoljan omjer razmaka trupova i duljine broda S/L , pri većim brzinama plovidbe katamarana dolazi do povoljne interferencije pramčanih valova što znači smanjen udio otpora valova u ukupnome otporu. Ova pretpostavka je dokazana ekstrapolacijom podataka s modela na brod u naravi.

Smanjenje sile ukupnog otpora katamarana ima za posljedicu smanjenu potrebnu snagu broda za oko 4% pri najvećem vertikalnom pomaku vodne linije, odnosno najvećoj oplakanoj površini. Dobiveni podatci ukazuju da bi se što točnije odredio otpor katamarana, trebalo bi imati i snimku modelskog ispitivanja između trupova broda kako bi se osiguralo što točnije očitavanje vodne linije na unutarnjim dijelovima trupovima broda te kako bi se točno mogla odrediti interferencija pramčanih valova, te utjecaj preostalog otpora na ukupni otpor katamarana.

LITERATURA

- [1] Otpor i propulzija broda, interna skripta, FSB
- [2] Stx Marine
(<http://www.stxmarine.net/cfd.html>)
- [3] Examiner-Amaryllis
(<http://www.examiner.com/article/herreshoff-s-1876-amaryllis-was-the-first-racing-catamaran>)
- [4] ITTC Recommended Procedures and Guidelines (ittc.sname.org)
- [5] Brodarski Institut –www.hrbi.hr
- [6] Cullen Sarles, Bradley Gelles and Amanda Malarkey, „An Investigation into the Effect of Section Shape on the Interference Resistance of Catamarans“, FAST 2011, Honolulu
- [7] D. Bailey, „ The NPL High Speed Round Bilge Displacement Hull Series“, RINA 1976.
- [8] A. Millward, K.M. Askew and P. Whattam, „ An Investigation into the Effect of Running Wetted Surface Area on the Resistance Components of a Catamaran“, International Shipbuilding Progress no 48., 2001
- [9] M. Insel and A. F. Molland, „ An Investigation into the Resistance Components of High Speed Displacement Catamarans“, RINA 1991.
- [10] A. F. Molland, J.F. Wellicome and P.R. Couser, „Resistance Experiments on a Systematic Series of High Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of Length- Displacement Ratio and Breadth- Draught Ratio“, University of Southampton 1994.
- [11] Mjerenja otpora i propulzije katamarana, Interni izvještaj, Brodarski Institut, Zagreb 2002.
- [12] Perez-Macias Martin, J. M., „Estimating wetted area of a model-hull from a set of camera images using, NURBS curves and surfaces“, M.Sc. Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2009.
- [13] Wikipedia – Live-wire Segmentation Technique
(www.wikipedia.org/wiki/Livewire_Segmentation_Technique)

- [14] Wikipedia – Sobel operator
(www.wikipedia.org/wiki/Sobel_operator)
- [15] Marintek –tank testing
(<http://www.sintef.no/home/MARINTEK/News/MARINTEK-responsible-for-three-new-MAROFF-projects/>)
- [16] Gizmag- AVG hulls
(<http://www.gizmag.com/air-support-hull-vessel/21697/>)
- [17] Steel Navy- wake patterns
(<http://www.steelnavy.com/WavePatterns.htm>)
- [18] Boat Design-wake patterns
(<http://www.boatdesign.net/forums/design-software/3d-2d-wake-patterns-33651.html>)